



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111446888 A

(43)申请公布日 2020.07.24

(21)申请号 202010343833.3

(22)申请日 2020.04.27

(71)申请人 北京理工大学

地址 100081 北京市海淀区中关村南大街5号

(72)发明人 程漓 乔栋 温昶煊 贾飞达

(74)专利代理机构 北京正阳理工知识产权代理
事务所(普通合伙) 11639

代理人 郭晓楠

(51)Int.Cl.

H02N 15/04(2006.01)

B64G 1/24(2006.01)

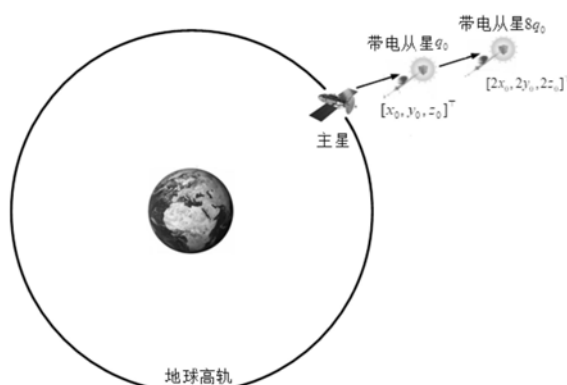
权利要求书5页 说明书11页 附图2页

(54)发明名称

一种基于人工磁场的洛伦兹力悬浮方法

(57)摘要

本发明涉及航空航天领域,特别涉及一种基于人工磁场的洛伦兹力悬浮方法,适用于地球高轨上利用带电航天器的悬浮观测任务。本发明通过运动方程的平衡点位置坐标与人工磁场方向之间的解析表达式,以及引入合适的量纲对平衡点位置方程无量纲化,进而得到任意悬浮位置对应的人工磁场方向,并给出了所需人工磁场方向下超导线圈中需要的电流大小。本发明只需调整主星上三个正交的超导线圈中的电流大小,就能得到任意的人工磁场的方向,就能实现所需的位于平衡点的悬浮任务,还可以通过改变从星上的带电量进一步调节悬浮位置,无需消耗额外的化学燃料,在近距离悬浮的空间观测任务中具有应用前景。



1. 一种基于人工磁场的洛伦兹力悬浮方法,其特征在于:包括以下步骤:

步骤一、建立带电从星在主星上方向可调的人工磁场作用下的运动方程;

主星在地球高轨上运行,带电从星不会受到地球磁场的扰动,主星上的人工磁场对从星产生洛伦兹力,所述主星上的人工磁场自旋且方向可调;洛伦兹力用于实现带电从星相对于主星的悬浮;带电从星在以主星为原点的当地水平当地垂直坐标系内的运动方程表示为,

$$\begin{cases} \ddot{x} - 2n\dot{y} - 3n^2x = f_x \\ \ddot{y} + 2n\dot{x} = f_y \\ \ddot{z} + n^2z = f_z \end{cases} \quad (1)$$

式中,带电从星的位置向量 $\mathbf{r} = (x, y, z)^\top$; 带电从星的速度向量 $\dot{\mathbf{r}} = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})^\top$; n 为主星轨道的平均角速度; $\mathbf{f}_L = (f_x, f_y, f_z)^\top$ 为带电从星所受的洛伦兹力,

$$\mathbf{f}_L = \frac{q}{m} \mathbf{v}_r \times \mathbf{B} = \frac{q}{m} \cdot (\dot{\mathbf{r}} - \boldsymbol{\omega}_c \times \mathbf{r}) \times \mathbf{B} \quad (2)$$

其中, $\frac{q}{m}$ 为带电从星的荷质比, $\mathbf{v}_r$ 为带电从星相对于主星的速度, $\boldsymbol{\omega}_c$ 为主星上人工磁场的角速度; $\mathbf{B}$ 为人工磁场的强度, 定义为:

$$\mathbf{B} = \frac{B_0}{r^2} \nabla \times (\mathbf{N} \times \mathbf{r}) \quad (3)$$

式中, $\mathbf{N} = [N_x, N_y, N_z]^\top$ 为人工磁场的方向, 而角速度可以表示为 $\boldsymbol{\omega}_c = \omega_c [N_x, N_y, N_z]^\top$, ω_c 为角速度的大小; B_0 是磁通量, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 为从星相对于主星的距离;

方程 (2) 中洛伦兹力的三个分量展开, 得到,

$$\left\{ \begin{aligned} f_x &= \frac{q}{m} \frac{B_0}{r^3} \left[\frac{3\mathbf{N} \cdot \mathbf{r}}{r^2} (\dot{y}z - \dot{z}y) - \omega_c (xN_z - zN_x) \left(\frac{3\mathbf{N} \cdot \mathbf{r}}{r^2} z - N_z \right) \right. \\ &\quad \left. + \dot{z}N_y - \dot{y}N_z + \omega_c (yN_x - xN_y) \left(\frac{3\mathbf{N} \cdot \mathbf{r}}{r^2} y - N_y \right) \right] \\ f_y &= \frac{q}{m} \frac{B_0}{r^3} \left[\frac{3\mathbf{N} \cdot \mathbf{r}}{r^2} (\dot{z}x - \dot{x}z) - \omega_c (yN_x - xN_y) \left(\frac{3\mathbf{N} \cdot \mathbf{r}}{r^2} x - N_x \right) \right. \\ &\quad \left. + \dot{x}N_z - \dot{z}N_x + \omega_c (zN_y - yN_z) \left(\frac{3\mathbf{N} \cdot \mathbf{r}}{r^2} z - N_z \right) \right] \\ f_z &= \frac{q}{m} \frac{B_0}{r^3} \left[\frac{3\mathbf{N} \cdot \mathbf{r}}{r^2} (\dot{x}y - \dot{y}x) - \omega_c (zN_y - yN_z) \left(\frac{3\mathbf{N} \cdot \mathbf{r}}{r^2} y - N_y \right) \right. \\ &\quad \left. + \dot{y}N_x - \dot{x}N_y + \omega_c (xN_z - zN_x) \left(\frac{3\mathbf{N} \cdot \mathbf{r}}{r^2} x - N_x \right) \right] \end{aligned} \right. \quad (4)$$

进一步展开公式(4)中洛伦兹力的分量,可得

$$\begin{aligned} f_x &= \frac{q}{m} \frac{B_0}{r^5} \left\{ \dot{y} \left[3z(xN_x + yN_y) - N_z(x^2 + y^2 - 2z^2) \right] + N_y \dot{z}(x^2 + z^2 - 2y^2) \right. \\ &\quad - 3y\dot{z}(xN_x + zN_z) - \omega_c (xN_y - yN_x) \left[3y(xN_x + zN_z) - N_y(x^2 + z^2 - 2y^2) \right] \\ &\quad \left. - \omega_c (xN_z - zN_x) \left[3z(xN_x + yN_y) - N_z(x^2 + y^2 - 2z^2) \right] \right\} \\ f_y &= \frac{q}{m} \frac{B_0}{r^5} \left\{ \dot{x} \left[-3z(xN_x + yN_y) + N_z(x^2 + y^2 - 2z^2) \right] - N_x \dot{z}(y^2 + z^2 - 2x^2) \right. \\ &\quad + 3x\dot{z}(yN_y + zN_z) + \omega_c (yN_x - xN_y) \left[3x(yN_y + zN_z) - N_x(y^2 + z^2 - 2x^2) \right] \\ &\quad \left. + \omega_c (yN_z - zN_y) \left[3z(xN_x + yN_y) - N_z(x^2 + y^2 - 2z^2) \right] \right\} \\ f_z &= \frac{q}{m} \frac{B_0}{r^5} \left\{ \dot{x} \left[3y(xN_x + zN_z) - N_y(x^2 + z^2 - 2y^2) \right] + N_x \dot{y}(y^2 + z^2 - 2x^2) \right. \\ &\quad - 3x\dot{y}(yN_y + zN_z) - \omega_c (zN_x - xN_z) \left[3x(yN_y + zN_z) - N_x(y^2 + z^2 - 2x^2) \right] \\ &\quad \left. - \omega_c (zN_y - yN_z) \left[3y(xN_x + zN_z) - N_y(x^2 + z^2 - 2y^2) \right] \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

步骤二、确定从星在主星上方向可调人工磁场作用下的相对运动方程的平衡点位置方程;

悬浮位置为从星相对于主星静止的点,也即相对运动方程(1)的平衡点,令 $\dot{x} = \dot{y} = \dot{z} = 0, \ddot{x} = \ddot{y} = \ddot{z} = 0$, 得到平衡点位置方程如下,

$$\left\{ \begin{array}{l} 3n^2x + \frac{q}{m} \frac{B_0 \omega_c}{r^5} \left\{ (zN_x - xN_z) [3z(xN_x + yN_y) - N_z(x^2 + y^2 - 2z^2)] \right. \\ \quad \left. + (yN_x - xN_y) [3y(xN_x + zN_z) - N_y(x^2 + z^2 - 2y^2)] \right\} \\ \quad (yN_x - xN_y) [3x(yN_y + zN_z) - N_x(y^2 + z^2 - 2x^2)] \\ \quad + (zN_y - yN_z) [3z(xN_x + yN_y) - N_z(x^2 + y^2 - 2z^2)] \\ n^2z + \frac{q}{m} \frac{B_0 \omega_c}{r^5} \left\{ (zN_y - yN_z) [3y(xN_x + zN_z) - N_y(x^2 + z^2 - 2y^2)] \right. \\ \quad \left. + (xN_z - zN_x) [3x(yN_y + zN_z) - N_x(y^2 + z^2 - 2x^2)] \right\} \end{array} \right. = 0 \quad (6)$$

在运动方程的平衡点,带电从星所受的地球引力与来自人工磁场的洛伦兹力相抵消,因此从星相对于主星是静止的,也即主从星之间的相对位置不变,而相对速度与相对加速度都为零;

步骤三、对步骤二的式(6)进行无量纲化处理;

引入单位长度 $a^* = \left| \frac{B_0 q}{n m \beta} \right|^{1/3}$, $\beta = n / \omega_c$ 为角速度的比值,对方程(6)进行无量纲化处理,

记无量纲的位置坐标为 $[X, Y, Z]^T = [x, y, z]^T / a^*$, 则得到无量纲的运动方程的平衡点位置方程为:

$$\left\{ \begin{array}{l} 3X + \frac{1}{R^5} \left\{ (ZN_x - XN_z) [3Z(XN_x + YN_y) - N_z(X^2 + Y^2 - 2Z^2)] \right. \\ \quad \left. + (YN_x - XN_y) [3Y(XN_x + ZN_z) - N_y(X^2 + Z^2 - 2Y^2)] \right\} \\ \quad (YN_x - XN_y) [3X(YN_y + ZN_z) - N_x(Y^2 + Z^2 - 2X^2)] \\ \quad - (ZN_y - YN_z) [3Z(XN_x + YN_y) - N_z(X^2 + Y^2 - 2Z^2)] \\ Z + \frac{1}{R^5} \left\{ (ZN_y - YN_z) [3Y(XN_x + ZN_z) - N_y(X^2 + Z^2 - 2Y^2)] \right. \\ \quad \left. + (XN_z - ZN_x) [3X(YN_y + ZN_z) - N_x(Y^2 + Z^2 - 2X^2)] \right\} \end{array} \right. = 0 \quad (7)$$

其中, $R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$ 为带电从星与主星之间无量纲的距离,

$[N_x, N_y, N_z]^T = [N_x, N_y, N_z]^T$ 为人工磁场的单位方向分量,大写下标是为了与无量纲坐标 $[X, Y, Z]^T$ 保持统一;

步骤四、根据给定的无量纲悬浮位置约束 $[X_0, Y_0, Z_0]^T$, 确定主星上人工磁场的方向;

实际任务中悬浮位置的无量纲坐标为 $[X_0, Y_0, Z_0]^T$, 也即平衡点的位置坐标为 $[X_0, Y_0, Z_0]^T$, 代入方程(7)并求解, 可得人工磁场的单位方向分量为:

$$\begin{cases} N_x = \sigma \sqrt{\frac{X_0^2 [5Y_0^2 Z_0^2 + 8Z_0^4 - X_0^2 (27Y_0^2 + 40Z_0^2)]^2}{4R_0 (Z_0^2 - 3X_0^2) [Y_0^2 Z_0^2 + X_0^2 (9Y_0^2 + 16Z_0^2)]}} \\ N_y = \sigma \zeta \frac{-Y_0 [-18X_0^4 + Z_0^2 (Y_0^2 - 2Z_0^2) + X_0^2 (9Y_0^2 + 28Z_0^2)]}{2\sqrt{R_0 (Z_0^2 - 3X_0^2) [Y_0^2 Z_0^2 + X_0^2 (9Y_0^2 + 16Z_0^2)]}} \\ N_z = \sigma \zeta \frac{-3Z_0 [-8X_0^4 + Y_0^2 Z_0^2 + X_0^2 (Y_0^2 + 8Z_0^2)]}{2\sqrt{R_0 (Z_0^2 - 3X_0^2) [Y_0^2 Z_0^2 + X_0^2 (9Y_0^2 + 16Z_0^2)]}} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $R_0 = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2}$; ζ 为式 $X_0 [5Y_0^2 Z_0^2 + 8Z_0^4 - X_0^2 (27Y_0^2 + 40Z_0^2)]$ 符号函数, 定义为

$$\zeta = \begin{cases} 1, & \text{if } X_0 [5Y_0^2 Z_0^2 + 8Z_0^4 - X_0^2 (27Y_0^2 + 40Z_0^2)] \geq 0 \\ -1, & \text{if } X_0 [5Y_0^2 Z_0^2 + 8Z_0^4 - X_0^2 (27Y_0^2 + 40Z_0^2)] < 0 \end{cases} \quad (9)$$

另外, σ 的值可以为1或者-1, 这也就表明, 对于任意给定的悬浮位置 $[X_0, Y_0, Z_0]^T$, 都存在两个可能的人工磁场方向, 即两组解; 而且这两个方向相反; 需要注意的是, 为了保证 N_x, N_y 和 N_z 都为实数, 无量纲坐标的分量必须满足: 当 $X_0 \neq 0$ 时, $Z_0^2 - 3X_0^2 > 0$, 也即 $|Z_0| > \sqrt{3} |X_0|$; 当 $X_0 = 0$ 时, 则没有以上约束条件;

步骤五、基于步骤四求解的人工磁场的方向分量, 来确定任意实际相对位置 $[x_0, y_0, z_0]^T$ 的悬浮所需的电流大小;

由于主星上的人工磁场是由三个正交的高温超导线圈构成的, 通过调节超导线圈中的电流大小, 能够得到不同指向的人工磁场; 磁通量与超导线圈各参数之间的关系如下

$$B_0 = \frac{\mu_0}{4\pi} n_c i_c \pi r_c^2 \quad (10)$$

其中, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N/A}^2$ 为真空磁导率, n_c 为线圈的圈数, i_c 为电流强度, r_c 为线圈的半径;

三个超导线圈的圈数和半径相同, 通过调整线圈中电流来实现不同方向的磁场; 记 i_c^* 为标称电流大小, 结合公式 (8), 得到三个线圈中的电流分别为

$$\begin{cases} i_x = i_c^* N_x \\ i_y = i_c^* N_y \\ i_z = i_c^* N_z \end{cases} \quad (11)$$

式中, i_x, i_y 和 i_z 分别对应着沿 x 轴、 y 轴和 z 轴的超导线圈中的电流大小;

公式 (8) 和 (11) 联合给出了特定的磁通量 B_0 下, 对于给定的超导线圈圈数以及半径, 实现无量纲相对位置为 $[X_0, Y_0, Z_0]^T$ 的悬浮所需的电流大小;

对于给定实际悬浮位置坐标 $[x_0, y_0, z_0]^T$,则需要将其无量纲化得到对应的无量纲坐标 $[X_0, Y_0, Z_0]^T$,才能利用步骤四求得三个线圈中所需电流的大小;具体方法如下:首先,根据标称电流 i_c 和线圈参数 n_c, r_c ,利用公式(10)计算出磁通量 B_0 ;接下来,基于给定的荷质比 $\frac{q}{m}$ 和角速度比值 β ,计算出单位长度 $a^* = \left| \frac{B_0}{n} \frac{q}{m} \frac{1}{\beta} \right|^{1/3}$ 的值,进而将实际的悬浮位置坐标 $[x_0, y_0, z_0]^T$ 转化成无量纲的位置坐标 $[X_0, Y_0, Z_0]^T$;最后,利用公式(8)求解出 N_x, N_y, N_z 的值,并带入公式(11)即可得到所需的电流大小 $[i_x, i_y, i_z]^T$,从而实现任意的实际位置 $[x_0, y_0, z_0]^T$ 的悬浮。

2.如权利要求1所述方法,其特征在于:能够通过从星的带电量实现悬浮位置的改变,具体方法为:

由于步骤五是基于给定的 $\frac{q}{m}$ 来确定单位长度的,因此在保持参数 n 和 β 的值不变时,能够通过改变带电从星的带电量 q ,来实现不同位置的悬浮;实际的电量与新的悬浮位置之间的关系如下

$$q = q_0 \left(\frac{ds}{ds_0} \right)^3 \quad (12)$$

其中, q_0 为悬浮坐标为 $[x_0, y_0, z_0]^T$ (对应悬浮距离为 $ds_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}$)时的标称带电量, q 为新的悬浮坐标为 $[x_1, y_1, z_1]^T$ (对应悬浮距离为 $ds = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}$)下所需的带电量;

需要说明的是,这里改变带电从星的带电量只能改变悬浮的距离,而不改变悬浮的方向矢量,也即新悬浮坐标 $[x_1, y_1, z_1]^T$ 与原坐标 $[x_0, y_0, z_0]^T$ 同向,且满足

$$[x_1, y_1, z_1]^T = \sqrt{\frac{ds}{ds_0}} [x_0, y_0, z_0]^T。$$

一种基于人工磁场的洛伦兹力悬浮方法

技术领域

[0001] 本发明涉及航空航天领域,特别涉及一种基于人工磁场的洛伦兹力悬浮方法,适用于地球高轨上利用带电航天器的悬浮观测任务。

背景技术

[0002] 洛伦兹力是一种新概念的无工质消耗的动力技术,可以利用主星上的人工磁场对带电从星产生的洛伦兹力来实现悬浮、伴飞、编队飞行等任务。与传统的化学推进相比,洛伦兹力只需要使从星带电、主星上部署可以调节方向的人工磁场,无需消耗燃料就能实现特定的任务,因为洛伦兹力在未来的空间悬浮、近距离观测等任务中具有很大的应用前景。

[0003] 现有的已发展的关于人工磁场下洛伦兹力先技术[1](参见高扬.洛伦兹力推进的带电卫星:轨道运动和推进概念[C].中国空间科学学会空间探测专业委员会第二十二次学术会议,大连,2009)提出了利用星间洛伦兹力作为来实现新概念航天任务(比如编队)的概念,主星上部署由高温超导体产生的人工磁场,从星带电且在主星附近运动,但是并未展开洛伦兹力下从星的动力学分析,也未提出悬浮设计的相关应用。

[0004] 在先技术[2](Y.Cheng,G.Gómez,J.J.Masdemont,J.Yuan.Analysis of the Relative Dynamics of a Charged Spacecraft Moving under the Influence of a Magnetic Field.Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 62:307-338,2018.)中给出了人工磁场的方向分别为径向、切向和法向时的平衡点。然而,先技术[2]中仅考虑了沿三个基本坐标轴方向的磁场指向,能够实现悬浮的位置也只是特定的平衡点,无法实现实际任务中可能需要的其它位置的悬浮观测。

[0005] 综上所述,在利用人工磁场下的洛伦兹力实现悬浮的技术尚处于初始研究的阶段,无法实现任意位置的悬浮。

发明内容

[0006] 本发明的目的是为了解决现有技术无法实现任意点悬浮观测的问题,提供一种基于人工磁场的洛伦兹力悬浮方法。该方法基于洛伦兹力实现带电从星相对于主星任意位置下的悬浮运动,也即相对于主星保持静止。主星上的人工磁场是由正交的三个超导线圈组成的,可以通过调节超导线圈中的电流大小来调节人工磁场的方向,得到任意坐标下的平衡点,从而实现任意位置的悬浮;也可以通过改变从星上的带电量进一步调整悬浮位置。以上两种情况都不需要消耗燃料来维持悬浮状态。本发明具有无化学推进剂污染的优点,在装配光敏载荷(如相机)的空间观测任务中具有很好的潜在应用。

[0007] 本发明的目的是通过下述技术方案实现的。

[0008] 一种基于人工磁场的洛伦兹力悬浮方法,通过建立带电从星在主星上方向可调的人工磁场下的运动方程,令相对速度与加速度为零,得到运动方程的平衡点(也即悬浮)位置坐标与人工磁场方向之间的解析表达式,并引入合适的量纲对平衡点位置方程无量纲化,进而得到任意悬浮位置对应的人工磁场方向,并给出了所需人工磁场方向下超导线圈

中需要的电流大小。所述方法只需调整主星上三个正交的超导线圈中的电流大小,就能得到任意的人工磁场的方向,就能实现所需的位于平衡点的悬浮任务,还可以通过改变从星上的带电量进一步调节悬浮位置,无需消耗额外的化学燃料,在近距离悬浮的空间观测任务中具有应用前景。

[0009] 一种基于人工磁场的洛伦兹力悬浮方法,包括以下步骤:

[0010] 步骤一、建立带电从星在主星上方向可调的人工磁场作用下的运动方程。

[0011] 主星在地球高轨上运行,带电从星不会受到地球磁场的扰动,主星上的人工磁场对从星产生洛伦兹力,所述主星上的人工磁场自旋且方向可调;洛伦兹力用于实现带电从星相对于主星的悬浮。带电从星在以主星为原点的当地水平当地垂直坐标系内的运动方程表示为,

$$[0012] \quad \begin{cases} \ddot{x} - 2n\dot{y} - 3n^2x = f_x \\ \ddot{y} + 2n\dot{x} = f_y \\ \ddot{z} + n^2z = f_z \end{cases} \quad (1)$$

[0013] 式中,带电从星的位置向量 $\mathbf{r} = (x, y, z)^T$; 带电从星的速度向量 $\dot{\mathbf{r}} = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})^T$; n 为主星绕地球运动的平均角速度。 $\mathbf{f}_L = (f_x, f_y, f_z)^T$ 为带电从星所受的洛伦兹力,

$$[0014] \quad \mathbf{f}_L = \frac{q}{m} \mathbf{v}_r \times \mathbf{B} = \frac{q}{m} \cdot (\dot{\mathbf{r}} - \boldsymbol{\omega}_c \times \mathbf{r}) \times \mathbf{B} \quad (2)$$

[0015] 其中, $\frac{q}{m}$ 为带电从星的荷质比, $\mathbf{v}_r$ 为带电从星相对于主星的速度, $\boldsymbol{\omega}_c$ 为主星上人工磁场的角速度; $\mathbf{B}$ 为人工磁场的强度, 定义为

$$[0016] \quad \mathbf{B} = \frac{B_0}{r^2} \nabla \times (\mathbf{N} \times \mathbf{r}) \quad (3)$$

[0017] 式中, $\mathbf{N} = [N_x, N_y, N_z]^T$ 为人工磁场的方向, 而角速度可以表示为 $\boldsymbol{\omega}_c = \omega_c [N_x, N_y, N_z]^T$, ω_c 为角速度的大小; B_0 是磁通量, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 为从星相对于主星的距离。

[0018] 方程 (2) 中洛伦兹力的三个分量展开, 得到,

$$\begin{cases}
 f_x = \frac{q}{m} \frac{B_0}{r^3} \left[\frac{3\mathbf{N} \cdot \mathbf{r}}{r^2} (\dot{y}z - \dot{z}y) - \omega_c (xN_z - zN_x) \left(\frac{3\mathbf{N} \cdot \mathbf{r}}{r^2} z - N_z \right) \right. \\
 \quad \left. + \dot{z}N_y - \dot{y}N_z + \omega_c (yN_x - xN_y) \left(\frac{3\mathbf{N} \cdot \mathbf{r}}{r^2} y - N_y \right) \right] \\
 f_y = \frac{q}{m} \frac{B_0}{r^3} \left[\frac{3\mathbf{N} \cdot \mathbf{r}}{r^2} (\dot{z}x - \dot{x}z) - \omega_c (yN_x - xN_y) \left(\frac{3\mathbf{N} \cdot \mathbf{r}}{r^2} x - N_x \right) \right. \\
 \quad \left. + \dot{x}N_z - \dot{z}N_x + \omega_c (zN_y - yN_z) \left(\frac{3\mathbf{N} \cdot \mathbf{r}}{r^2} z - N_z \right) \right] \\
 f_z = \frac{q}{m} \frac{B_0}{r^3} \left[\frac{3\mathbf{N} \cdot \mathbf{r}}{r^2} (\dot{x}y - \dot{y}x) - \omega_c (zN_y - yN_z) \left(\frac{3\mathbf{N} \cdot \mathbf{r}}{r^2} y - N_y \right) \right. \\
 \quad \left. + \dot{y}N_x - \dot{x}N_y + \omega_c (xN_z - zN_x) \left(\frac{3\mathbf{N} \cdot \mathbf{r}}{r^2} x - N_x \right) \right]
 \end{cases} \quad (4)$$

[0020] 进一步展开公式(4)中洛伦兹力的分量,得

$$\begin{aligned}
 f_x &= \frac{q}{m} \frac{B_0}{r^5} \left\{ \dot{y} \left[3z(xN_x + yN_y) - N_z(x^2 + y^2 - 2z^2) \right] + N_y \dot{z}(x^2 + z^2 - 2y^2) \right. \\
 &\quad - 3y\dot{z}(xN_x + zN_z) - \omega_c (xN_y - yN_x) \left[3y(xN_x + zN_z) - N_y(x^2 + z^2 - 2y^2) \right] \\
 &\quad \left. - \omega_c (xN_z - zN_x) \left[3z(xN_x + yN_y) - N_z(x^2 + y^2 - 2z^2) \right] \right\} \\
 f_y &= \frac{q}{m} \frac{B_0}{r^5} \left\{ \dot{x} \left[-3z(xN_x + yN_y) + N_z(x^2 + y^2 - 2z^2) \right] - N_x \dot{z}(y^2 + z^2 - 2x^2) \right. \\
 &\quad + 3x\dot{z}(yN_y + zN_z) + \omega_c (yN_x - xN_y) \left[3x(yN_y + zN_z) - N_x(y^2 + z^2 - 2x^2) \right] \\
 &\quad \left. + \omega_c (yN_z - zN_y) \left[3z(xN_x + yN_y) - N_z(x^2 + y^2 - 2z^2) \right] \right\} \\
 f_z &= \frac{q}{m} \frac{B_0}{r^5} \left\{ \dot{x} \left[3y(xN_x + zN_z) - N_y(x^2 + z^2 - 2y^2) \right] + N_x \dot{y}(y^2 + z^2 - 2x^2) \right. \\
 &\quad - 3x\dot{y}(yN_y + zN_z) - \omega_c (zN_x - xN_z) \left[3x(yN_y + zN_z) - N_x(y^2 + z^2 - 2x^2) \right] \\
 &\quad \left. - \omega_c (zN_y - yN_z) \left[3y(xN_z + zN_x) - N_y(x^2 + z^2 - 2y^2) \right] \right\}
 \end{aligned} \quad (5)$$

[0022] 步骤二、确定从星在主星方向可调人工磁场作用下的相对运动方程的平衡点位置方程。

[0023] 悬浮位置为从星相对于主星静止的点,也即相对运动方程(1)的平衡点,令 $\dot{x} = \dot{y} = \dot{z} = 0, \ddot{x} = \ddot{y} = \ddot{z} = 0$, 得到平衡点位置方程如下,

$$[0024] \quad \begin{cases} 3n^2x + \frac{q}{m} \frac{B_0 \omega_c}{r^5} \left\{ (zN_x - xN_z) [3z(xN_x + yN_y) - N_z(x^2 + y^2 - 2z^2)] \right. \\ \quad \left. + (yN_x - xN_y) [3y(xN_x + zN_z) - N_y(x^2 + z^2 - 2y^2)] \right\} = 0 \\ (yN_x - xN_y) [3x(yN_y + zN_z) - N_x(y^2 + z^2 - 2x^2)] \\ \quad + (zN_y - yN_z) [3z(xN_x + yN_y) - N_z(x^2 + y^2 - 2z^2)] = 0 \\ n^2z + \frac{q}{m} \frac{B_0 \omega_c}{r^5} \left\{ (zN_y - yN_z) [3y(xN_x + zN_z) - N_y(x^2 + z^2 - 2y^2)] \right. \\ \quad \left. + (xN_z - zN_x) [3x(yN_y + zN_z) - N_x(y^2 + z^2 - 2x^2)] \right\} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

[0025] 在运动方程的平衡点,带电从星所受的地球引力与来自人工磁场的洛伦兹力相抵消,因此从星相对于主星是静止的,也即主从星之间的相对位置不变,而相对速度与相对加速度都为零。

[0026] 步骤三、对步骤二的式(6)进行无量纲化处理。

[0027] 引入单位长度 $a^* = \left| \frac{B_0}{n} \frac{q}{m} \frac{1}{\beta} \right|^{1/3}$, $\beta = n / \omega_c$ 为角速度的比值,对方程(6)进行无量纲

化处理,记无量纲的位置坐标为 $[X, Y, Z]^T = [x, y, z]^T / a^*$, 则得到无量纲的运动方程的平衡点位置方程为:

$$[0028] \quad \begin{cases} 3X + \frac{1}{R^5} \left\{ (ZN_x - XN_z) [3Z(XN_x + YN_y) - N_z(X^2 + Y^2 - 2Z^2)] \right. \\ \quad \left. + (YN_x - XN_y) [3Y(XN_x + ZN_z) - N_y(X^2 + Z^2 - 2Y^2)] \right\} = 0 \\ (YN_x - XN_y) [3X(YN_y + ZN_z) - N_x(Y^2 + Z^2 - 2X^2)] \\ \quad - (ZN_y - YN_z) [3Z(XN_x + YN_y) - N_z(X^2 + Y^2 - 2Z^2)] = 0 \\ Z + \frac{1}{R^5} \left\{ (ZN_y - YN_z) [3Y(XN_x + ZN_z) - N_y(X^2 + Z^2 - 2Y^2)] \right. \\ \quad \left. + (XN_z - ZN_x) [3X(YN_y + ZN_z) - N_x(Y^2 + Z^2 - 2X^2)] \right\} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

[0029] 其中, $R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$ 为带电从星与主星之间无量纲的距离, $[N_x, N_y, N_z]^T = [N_x, N_y, N_z]^T$ 为人工磁场的单位方向分量,大写下标是为了与无量纲坐标 $[X, Y, Z]^T$ 保持统一。

[0030] 步骤四、根据给定的无量纲悬浮位置约束 $[X_0, Y_0, Z_0]^T$, 确定主星上人工磁场的方向。

[0031] 实际任务中悬浮位置的无量纲坐标为 $[X_0, Y_0, Z_0]^T$, 也即平衡点的位置坐标为 $[X_0, Y_0, Z_0]^T$, 代入方程(7)并求解可得人工磁场的单位方向分量为:

$$[0032] \quad \begin{cases} N_x = \sigma \sqrt{\frac{X_0^2 [5Y_0^2 Z_0^2 + 8Z_0^4 - X_0^2 (27Y_0^2 + 40Z_0^2)]^2}{4R_0 (Z_0^2 - 3X_0^2) [Y_0^2 Z_0^2 + X_0^2 (9Y_0^2 + 16Z_0^2)]}} \\ N_y = \sigma \zeta \frac{-Y_0 [-18X_0^4 + Z_0^2 (Y_0^2 - 2Z_0^2) + X_0^2 (9Y_0^2 + 28Z_0^2)]}{2\sqrt{R_0 (Z_0^2 - 3X_0^2) [Y_0^2 Z_0^2 + X_0^2 (9Y_0^2 + 16Z_0^2)]}} \\ N_z = \sigma \zeta \frac{-3Z_0 [-8X_0^4 + Y_0^2 Z_0^2 + X_0^2 (Y_0^2 + 8Z_0^2)]}{2\sqrt{R_0 (Z_0^2 - 3X_0^2) [Y_0^2 Z_0^2 + X_0^2 (9Y_0^2 + 16Z_0^2)]}} \end{cases} \quad (8)$$

[0033] 式中, $R_0 = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2}$; ζ 为式 $X_0 [5Y_0^2 Z_0^2 + 8Z_0^4 - X_0^2 (27Y_0^2 + 40Z_0^2)]$ 符号函数, 定义为

$$[0034] \quad \zeta = \begin{cases} 1, & \text{if } X_0 [5Y_0^2 Z_0^2 + 8Z_0^4 - X_0^2 (27Y_0^2 + 40Z_0^2)] \geq 0 \\ -1, & \text{if } X_0 [5Y_0^2 Z_0^2 + 8Z_0^4 - X_0^2 (27Y_0^2 + 40Z_0^2)] < 0 \end{cases} \quad (9)$$

[0035] 另外, σ 的值可以为1或者-1, 这也就表明, 对于任意给定的悬浮位置 $[X_0, Y_0, Z_0]^T$, 都存在两个可能的人工磁场方向, 即两组解; 而且这两个方向相反。需要注意的是, 为了保证 N_x, N_y 和 N_z 都为实数, 无量纲坐标的分量必须满足: 当 $X_0 \neq 0$ 时, $Z_0^2 - 3X_0^2 > 0$, 也即 $|Z_0| > \sqrt{3} |X_0|$; 当 $X_0 = 0$ 时, 则没有以上约束条件。

[0036] 步骤五、基于步骤四求解的人工磁场的方向分量, 来确定任意实际相对位置 $[x_0, y_0, z_0]^T$ 的悬浮所需的电流大小。

[0037] 由于主星上的人工磁场是由三个正交的高温超导线圈构成的, 通过调节超导线圈中的电流大小, 能够得到不同指向的人工磁场。磁通量与超导线圈各参数之间的关系如下

$$[0038] \quad B_0 = \frac{\mu_0}{4\pi} n_c i_c \pi r_c^2 \quad (10)$$

[0039] 其中, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N/A}^2$ 为真空磁导率, n_c 为线圈的圈数, i_c 为电流强度, r_c 为线圈的半径。

[0040] 三个超导线圈的圈数和半径相同, 通过调整线圈中电流来实现不同方向的磁场。记 i_c^* 为标称电流大小, 结合公式 (8), 得到三个线圈中的电流分别为

$$[0041] \quad \begin{cases} i_x = i_c^* N_x \\ i_y = i_c^* N_y \\ i_z = i_c^* N_z \end{cases} \quad (11)$$

[0042] 式中, i_x, i_y 和 i_z 分别对应着沿 x 轴、 y 轴和 z 轴的超导线圈中的电流大小。

[0043] 公式 (8) 和 (11) 联合给出了特定的磁通量 B_0 下, 对于给定的超导线圈圈数以及半径, 实现无量纲相对位置为 $[X_0, Y_0, Z_0]^T$ 的悬浮所需的电流大小。

[0044] 对于给定实际悬浮位置坐标 $[x_0, y_0, z_0]^T$,则需要将其无量纲化得到对应的无量纲坐标 $[X_0, Y_0, Z_0]^T$,才能利用步骤四求得三个线圈中所需电流的大小。具体方法如下:首先,根据标称电流 i_c 和线圈参数 n_c, r_c ,利用公式(10)计算出磁通量 B_0 ;接下来,基于给定的荷质比 $\frac{q}{m}$ 和角速度比值 β ,计算出单位长度 $a^* = \left| \frac{B_0}{n} \frac{q}{m} \frac{1}{\beta} \right|^{1/3}$ 的值,进而将实际的悬浮位置坐标 $[x_0, y_0, z_0]^T$ 转化成无量纲的位置坐标 $[X_0, Y_0, Z_0]^T$;最后,利用公式(8)求解出 N_x, N_y, N_z 的值,并带入公式(11)即可得到所需的电流大小 $[i_x, i_y, i_z]^T$,从而实现任意的实际位置 $[x_0, y_0, z_0]^T$ 的悬浮。

[0045] 通过从星的带电量改变悬浮位置的方法:

[0046] 基于步骤五中求得的电流大小,通过调整带电从星的带电量,可以进一步改变悬浮位置。

[0047] 由于步骤五是基于给定的 $\frac{q}{m}$ 来确定单位长度的,因此在保持参数 n 和 β 的值不变时,能够通过改变带电从星的带电量 q ,来实现不同位置的悬浮。实际的电量与新的悬浮位置之间的关系如下

$$[0048] \quad q = q_0 \left(\frac{ds}{ds_0} \right)^3 \quad (12)$$

[0049] 其中, q_0 为悬浮坐标为 $[x_0, y_0, z_0]^T$ (对应悬浮距离为 $ds_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}$)时的标称带电量, q 为新的悬浮坐标为 $[x_1, y_1, z_1]^T$ (对应悬浮距离为 $ds = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}$)下所需的带电量。

[0050] 需要说明的是,这里改变带电从星的带电量只能改变悬浮的距离,而不改变悬浮的方向矢量,也即新悬浮坐标 $[x_1, y_1, z_1]^T$ 与原坐标 $[x_0, y_0, z_0]^T$ 同向,且满足

$$[x_1, y_1, z_1]^T = \sqrt{\frac{ds}{ds_0}} [x_0, y_0, z_0]^T。$$

[0051] 有益效果:

[0052] 一种基于人工磁场的洛伦兹力悬浮方法

[0053] 1、本发明公开的一种基于人工磁场的洛伦兹力悬浮方法,通过调节主星上人工磁场的三个超导线圈中的电流大小,可以得到任意的人工磁场指向,从而获得任意坐标的平衡点,最终实现带电从星相对于主星任意位置的悬浮。

[0054] 2、本发明公开的一种基于人工磁场的洛伦兹力悬浮方法,利用主星上的人工磁场对带电从星产生的洛伦兹力来实现悬浮,也即通过洛伦兹力使主从星之间保持给定的相对位置不变,因此无需消耗传统的化学燃料,故不会产生化学污染,适用于带有相机等光敏载荷的卫星。

[0055] 3、本发明公开的一种基于人工磁场的洛伦兹力悬浮方法,可以通过改变从星的带电量,在保持悬浮相对位置矢量方向不变的情况下,调节悬浮的位置。

[0056] 4、本发明公开的一种基于人工磁场的洛伦兹力悬浮方法,由于具有上述有益效果,因此,在近距离悬浮、长时间的空间观测任务等中有很大的应用前景。

附图说明

[0057] 图1是本发明的一种基于人工磁场的洛伦兹力悬浮方法的流程图;

[0058] 图2是本发明的三个正交的高温超导线圈示意图;

[0059] 图3是本发明的位于地球高轨上的悬浮任务示意图。

具体实施方式

[0060] 下面结合附图以及具体实施方式对本发明做进一步说明。

[0061] 实施例1:

[0062] 本实施例公开的一种基于人工磁场的洛伦兹力悬浮方法,考虑对地球同步轨道(轨道半径为42164km)上的航天器进行长期跟踪观测的任务,可以通过在该航天器(也即主星)附近,比如1km的位置,部署一颗带电从星来实现悬浮,从而达到对主星连续跟踪监测的目的。传统的悬浮任务中需要一直消耗化学推进剂,才能实现从星相对于主星的悬浮,本实施例只需使从星带电,并通过调节主星上超导线圈中的电流来获得特定指向的人工磁场,就能实现任意位置的悬浮。具体步骤如下:

[0063] 步骤一、建立带电从星在地球引力以及主星人工磁场作用下的运动方程。主星的轨道为地球同步轨道,因此,地球磁场对带电从星的扰动作用可以忽略不计。带电从星只受到地心引力和主星上人工磁场产生的洛伦兹力的共同影响,其以主星为原点的当地水平当地垂直坐标系内的运动方程表示为,

$$[0064] \quad \begin{cases} \ddot{x} - 2n\dot{y} - 3n^2x = f_x \\ \ddot{y} + 2n\dot{x} = f_y \\ \ddot{z} + n^2z = f_z \end{cases} \quad (13)$$

[0065] 式中, $n = 7.2922 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ 为主星所在地球同步轨道的平均角速度,

$\mathbf{f}_L = (f_x, f_y, f_z)^T$ 为带电从星所受的洛伦兹力,

$$[0066] \quad \mathbf{f}_L = \frac{q}{m} \cdot (\dot{\mathbf{r}} - \boldsymbol{\omega}_c \times \mathbf{r}) \times \mathbf{B} \quad (14)$$

[0067] 其中, $\frac{q}{m}$ 为带电从星的荷质比, $\mathbf{v}_r$ 为带电从星相对于主星的速度, $\boldsymbol{\omega}_c$ 为主星上自旋磁场的角速度;记 $\mathbf{N} = [N_x, N_y, N_z]^T$ 为磁场的方向, B_0 是磁通量,人工磁场的强度定义为

$$\mathbf{B} = \frac{B_0}{r^2} \nabla \times (\mathbf{N} \times \mathbf{r})。$$

[0068] 方程(2)中的三个分量展开,可以得到,

$$\begin{aligned}
f_x &= \frac{q}{m} \frac{B_0}{r^5} \left\{ \dot{y} \left[3z(xN_x + yN_y) - N_z(x^2 + y^2 - 2z^2) \right] + N_y \dot{z}(x^2 + z^2 - 2y^2) \right. \\
&\quad - 3y\dot{z}(xN_x + zN_z) - \omega_c(xN_y - yN_x) \left[3y(xN_x + zN_z) - N_y(x^2 + z^2 - 2y^2) \right] \\
&\quad \left. - \omega_c(xN_z - zN_x) \left[3z(xN_x + yN_y) - N_z(x^2 + y^2 - 2z^2) \right] \right\} \\
f_y &= \frac{q}{m} \frac{B_0}{r^5} \left\{ \dot{x} \left[-3z(xN_x + yN_y) + N_z(x^2 + y^2 - 2z^2) \right] - N_x \dot{z}(y^2 + z^2 - 2x^2) \right. \\
[0069] \quad &\quad + 3x\dot{z}(yN_y + zN_z) + \omega_c(yN_x - xN_y) \left[3x(yN_y + zN_z) - N_x(y^2 + z^2 - 2x^2) \right] \\
&\quad \left. + \omega_c(yN_z - zN_y) \left[3z(xN_x + yN_y) - N_z(x^2 + y^2 - 2z^2) \right] \right\} \\
f_z &= \frac{q}{m} \frac{B_0}{r^5} \left\{ \dot{x} \left[3y(xN_x + zN_z) - N_y(x^2 + z^2 - 2y^2) \right] + N_x \dot{y}(y^2 + z^2 - 2x^2) \right. \\
&\quad - 3x\dot{y}(yN_y + zN_z) - \omega_c(zN_x - xN_z) \left[3x(yN_y + zN_z) - N_x(y^2 + z^2 - 2x^2) \right] \\
&\quad \left. - \omega_c(zN_y - yN_z) \left[3y(xN_z + zN_x) - N_y(x^2 + z^2 - 2y^2) \right] \right\}
\end{aligned} \tag{15}$$

[0070] 其中, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 为带电从星相对于主星的距离。

[0071] 步骤二、确定平衡点的位置方程,也即令方程(13)中 $\dot{x} = \dot{y} = \dot{z} = 0, \ddot{x} = \ddot{y} = \ddot{z} = 0$, 可以得到

$$[0072] \quad \begin{cases} 3n^2x + \frac{q}{m} \frac{B_0\omega_c}{r^5} \left\{ (zN_x - xN_z) \left[3z(xN_x + yN_y) - N_z(x^2 + y^2 - 2z^2) \right] \right. \\ \quad \left. + (yN_x - xN_y) \left[3y(xN_x + zN_z) - N_y(x^2 + z^2 - 2y^2) \right] \right\} \\ \quad (yN_x - xN_y) \left[3x(yN_y + zN_z) - N_x(y^2 + z^2 - 2x^2) \right] \\ \quad + (zN_y - yN_z) \left[3z(xN_x + yN_y) - N_z(x^2 + y^2 - 2z^2) \right] \end{cases} = 0 \\
n^2z + \frac{q}{m} \frac{B_0\omega_c}{r^5} \left\{ (zN_y - yN_z) \left[3y(xN_x + zN_z) - N_y(x^2 + z^2 - 2y^2) \right] \right. \\ \quad \left. + (xN_z - zN_x) \left[3x(yN_y + zN_z) - N_x(y^2 + z^2 - 2x^2) \right] \right\} = 0 \end{cases} \tag{16}$$

[0073] 步骤三、对步骤二的式(16)进行无量纲化处理。

[0074] 引入单位长度 $a^* = \left| \frac{B_0}{n} \frac{q}{m} \frac{1}{\beta} \right|^{1/3}$, 并定义无量纲的坐标 $[X, Y, Z]^T = [x, y, z]^T / a^*$

, 那么平衡点的位置方程(16)可以表示成无量纲的形式:

$$[0075] \quad \begin{cases} 3X + \frac{1}{R^5} \left\{ (ZN_X - XN_Z) [3Z(XN_X + YN_Y) - N_Z(X^2 + Y^2 - 2Z^2)] \right. \\ \quad \left. + (YN_X - XN_Y) [3Y(XN_X + ZN_Z) - N_Y(X^2 + Z^2 - 2Y^2)] \right\} \\ \quad (YN_X - XN_Y) [3X(YN_Y + ZN_Z) - N_X(Y^2 + Z^2 - 2X^2)] \\ \quad - (ZN_Y - YN_Z) [3Z(XN_X + YN_Y) - N_Z(X^2 + Y^2 - 2Z^2)] \\ \quad \left. Z + \frac{1}{R^5} \left\{ (ZN_Y - YN_Z) [3Y(XN_X + ZN_Z) - N_Y(X^2 + Z^2 - 2Y^2)] \right. \right. \\ \quad \left. \left. + (XN_Z - ZN_X) [3X(YN_Y + ZN_Z) - N_X(Y^2 + Z^2 - 2X^2)] \right\} \right\} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

[0076] 其中, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 为带电从星相对于主星的距离。

[0077] 步骤四、根据给定的无量纲悬浮位置约束 $[X_0, Y_0, Z_0]^T$, 确定主星上人工磁场的方向。

[0078] 给定无量纲的悬浮位置 $[X_0, Y_0, Z_0]^T$, 也即方程 (17) 中的平衡点坐标为 $[X_0, Y_0, Z_0]^T$, 代入可求得人工磁场的单位方向分量为

$$[0079] \quad \begin{cases} N_X = \sigma \sqrt{\frac{X_0^2 [5Y_0^2 Z_0^2 + 8Z_0^4 - X_0^2 (27Y_0^2 + 40Z_0^2)]^2}{4R_0(Z_0^2 - 3X_0^2) [Y_0^2 Z_0^2 + X_0^2 (9Y_0^2 + 16Z_0^2)]}} \\ N_Y = \sigma \zeta \frac{-Y_0 [-18X_0^4 + Z_0^2 (Y_0^2 - 2Z_0^2) + X_0^2 (9Y_0^2 + 28Z_0^2)]}{2\sqrt{R_0(Z_0^2 - 3X_0^2) [Y_0^2 Z_0^2 + X_0^2 (9Y_0^2 + 16Z_0^2)]}} \\ N_Z = \sigma \zeta \frac{-3Z_0 [-8X_0^4 + Y_0^2 Z_0^2 + X_0^2 (Y_0^2 + 8Z_0^2)]}{2\sqrt{R_0(Z_0^2 - 3X_0^2) [Y_0^2 Z_0^2 + X_0^2 (9Y_0^2 + 16Z_0^2)]}} \end{cases} \quad (18)$$

[0080] 式中, $R_0 = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2}$ 为带电从星相对于主星的无量纲距离。 σ 的取值可以为 1 或者 -1, 因此, 对于任意给定的悬浮位置, 都存在两个互为反向的人工磁场方向解。需要注意的是, 为了保证 N_X, N_Y 和 N_Z 都为实数, 无量纲坐标的分量必须满足: 当 $X_0 \neq 0$ 时, $Z_0^2 - 3X_0^2 > 0$, 也即 $|Z_0| > \sqrt{3} |X_0|$; 当 $X_0 = 0$ 时, 则没有以上约束条件。另外, ζ 为式 $X_0 [5Y_0^2 Z_0^2 + 8Z_0^4 - X_0^2 (27Y_0^2 + 40Z_0^2)]$ 的符号函数, 定义为

$$[0081] \quad \zeta = \begin{cases} 1, & \text{if } X_0 [5Y_0^2 Z_0^2 + 8Z_0^4 - X_0^2 (27Y_0^2 + 40Z_0^2)] \geq 0 \\ -1, & \text{if } X_0 [5Y_0^2 Z_0^2 + 8Z_0^4 - X_0^2 (27Y_0^2 + 40Z_0^2)] < 0 \end{cases} \quad (19)$$

[0082] 步骤五、基于步骤四求解的人工磁场的方向分量, 来确定任意实际相对位置 $[x_0, y_0, z_0]^T$ 的悬浮所需的电流大小。

[0083] 本发明利用三个超导线圈来构建主星上的人工磁场,如图2所示,三个线圈的圈数 n_c 和半径 i_c 都相同,通过调整线圈中电流来实现不同方向的磁场。磁通量 B_0 与线圈参数之间的关系如下

$$[0084] \quad B_0 = \frac{\mu_0}{4\pi} n_c i_c \pi r_c^2 \quad (20)$$

[0085] 其中, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N/A}^2$ 为真空磁导率, i_c 为线圈中电流强度。记 i_c^* 为标称电流大小,则三个线圈中的电流大小可以表示为

$$[0086] \quad \begin{cases} i_x = i_c^* N_x \\ i_y = i_c^* N_y \\ i_z = i_c^* N_z \end{cases} \quad (21)$$

[0087] 式中, i_x 、 i_y 和 i_z 分别对应着沿x轴、y轴和z轴的超导线圈中的电流大小。

[0088] 首先考虑 $X_0 \neq 0$ (也即 $x_0 \neq 0$) 的情况,随机选择实际悬浮位置为 $[0.3304, 0.0885, 0.9397]^T \text{ km}$ (满足 $z_0 = 0.9397 > \sqrt{3}x_0 = 0.5703$),与主星的悬浮距离为1km。需要将实际悬浮位置转化为无量纲的坐标才能进一步求解所需电流。首先,选取线圈的圈数为 $n_c = 100$,半径为 $r_c = 1 \text{ m}$,标称电流 $i_c^* = 10 \text{ A}$,计算出磁通量 $B_0 = 3.1416 \times 10^{-4} \text{ T} \cdot \text{m}^2$ 。另外,取角速度比值 $\beta = 1 \times 10^{-4}$,也即主星上人工磁场的自旋角速度为 $\omega_c = 0.72922 \text{ rad/s}$,带电从星的荷质比 $\frac{q}{m} = 0.03 \text{ C/kg}$,从而得到单位长度

$$a^* = \left| \frac{B_0 q}{n m \beta} \right|^{1/3} = 10.8928 \text{ km} \text{ 的值。然后,将实际所需的悬浮位置坐标} [0.3304, 0.0885, 0.9397]^T$$

km转化成无量纲的位置坐标 $[X_0, Y_0, Z_0]^T = [0.0303, 0.0081, 0.0863]^T$ 。最后,利用公式(18)可计算得到 $N_x = 0.0118, N_y = -0.0012, N_z = -0.0288$,并带入公式(21)即可得到三个超导线圈中的电流大小分别为 $i_x = 0.118 \text{ A}, i_y = -0.012 \text{ A}, N_z = 0.288 \text{ A}$ 。

[0089] 接下来,考虑 $X_0 = 0$ 的情况,随机选择实际悬浮位置 $[0, 0.3420, 0.9397]^T \text{ km}$ 。利用以上同样的人工磁场、标称电流,荷质比,也即同样的单位长度,可以得到对应的磁场方向分量为 $N_x = 0, N_y = 0.0229, N_z = -0.0134$,而三个超导线圈中的电流大小分别为 $i_x = 0 \text{ A}, i_y = 0.229 \text{ A}, N_z = -0.134 \text{ A}$ 。

[0090] 以上给出了为实现任意悬浮坐标,所需的人工磁场中超导线圈中的电流大小。其中悬浮坐标需要满足约束:当 $x_0 \neq 0$ 时, $|z_0| > \sqrt{3}|x_0|$ 。

[0091] 通过从星的带电量改变悬浮位置的方法:

[0092] 由于之前的步骤中采用的是无量纲的悬浮坐标,长度单位为 a^* ,这就为改变悬浮位置提供了新的思路:保持无量纲的悬浮位置不变,通过改变从星的带电量 q ,可以改变 a^* 的值,进而改变实际的悬浮坐标。记悬浮距离 $ds_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}$ 下的标称带电量为 q_0 ,

新的悬浮距离 $ds = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 下所需的带电量为

$$[0093] \quad q = q_0 \left(\frac{ds}{ds_0} \right)^3 \quad (22)$$

[0094] 如图3所示,当步骤五的悬浮位置为 $[0.3304, 0.0885, 0.9397]^T$ km (距离主星1km) 时从星带电量为 q_0 。改变从星的带电量为 $8q_0$,从而使单位长度变为原来的2倍,即可实现距离2km的悬浮,新的悬浮位置为 $[2x_0, 2y_0, 2z_0]^T = [0.6608, 0.1770, 1.8794]^T$ km。值得说明的是,改变从星带电量时,仅能改变悬浮距离,悬浮矢量仍沿着原悬浮相对位置矢量的方向。

[0095] 以上所述的具体描述,对发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明,所应理解的是,以上所述仅为本发明的具体实施例而已,并不用于限定本发明的保护范围,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

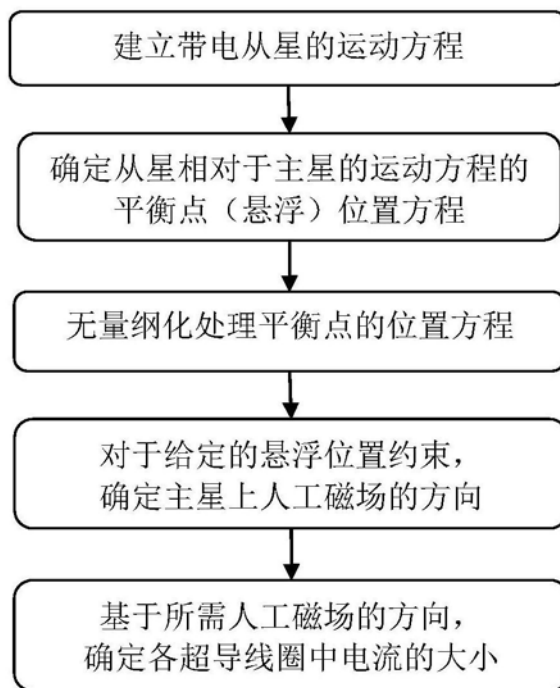


图1

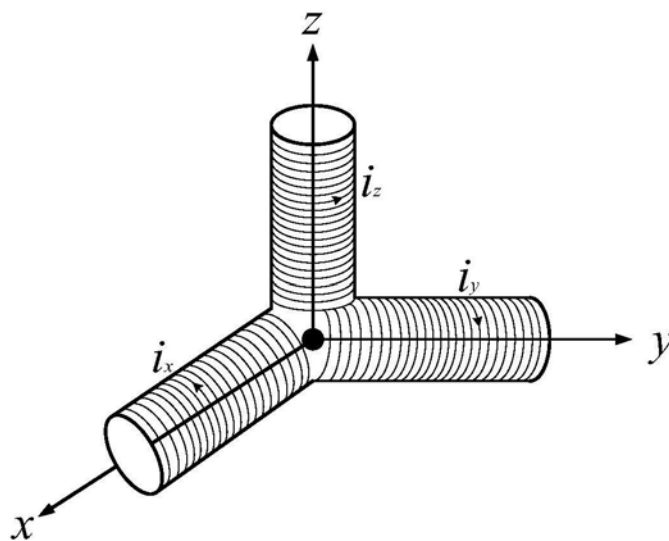


图2

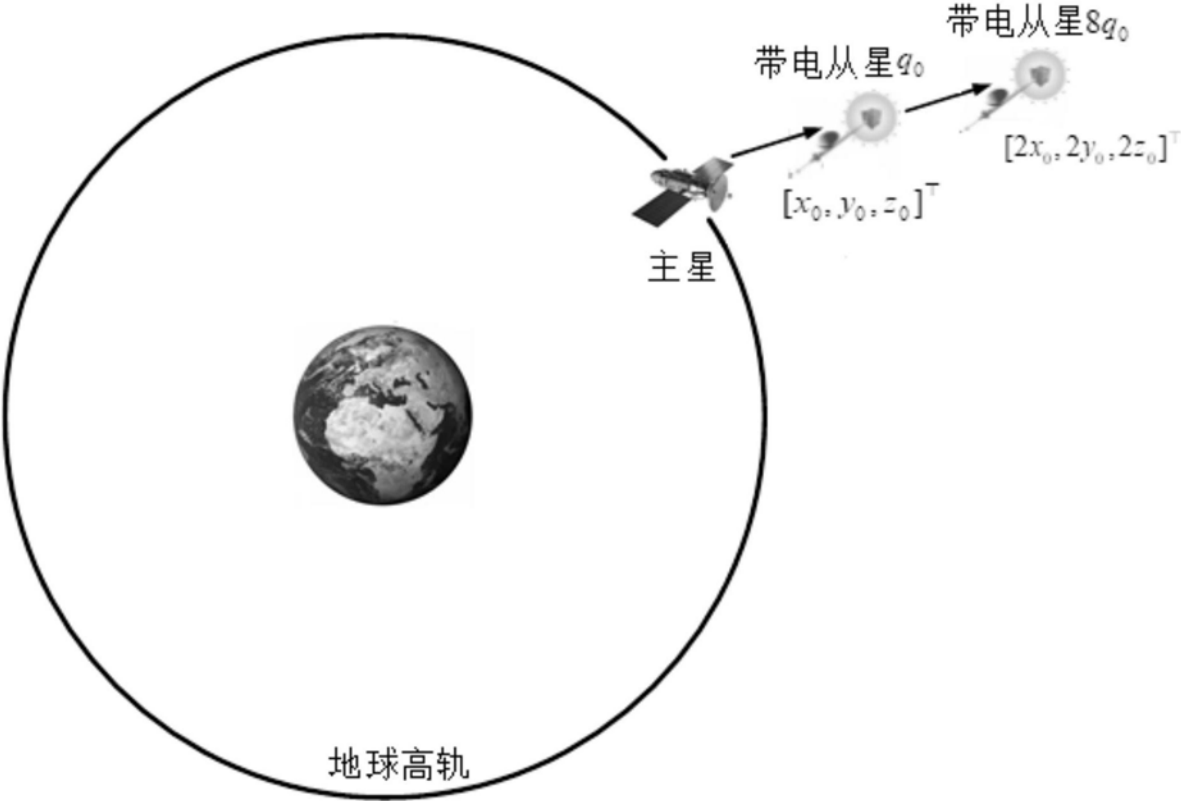


图3